

# A 67P/Csurjumov-Geraszimenko üstökös diamágneses ürege – Rosetta eredmények

Németh Z.<sup>1</sup>, Timár A.<sup>1</sup>, Szegő K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

*A diamágneses üreg az üstökösök plazmakörnyezetének azon része, ahonnan az üstökösmagból kifelé áramló gáz és plazma kiszorítja a mágneses teret. A Rosetta küldetés előtt ezt a jelenséget csupán egyszer észlelték; amikor a Giotto űrszonda nagy sebességgel elrepült az 1P/Halley üstökös közelében, és rövid ideig a mágneses tértől mentes tartományban haladt. A nemrég befejeződött Rosetta küldetés egyedülálló lehetőséget biztosított a 67P üstökös plazmakörnyezetének kutatására, mivel a mag aktivitásának kezdetétől egészen az aktivitás végéig közelről figyelte az ott zajló jelenségeket. A szonda 2015 nyarán többször is a diamágneses üregen belül tartózkodott. Kidolgoztunk egy módszert, amelynek segítségével könnyebben megtalálhatók az üreg-áthaladások. Az alapos elemzés több száz olyan eseményt mutatott ki, amikor a Rosetta pályája rövidebb-hosszabb ideig az üreg belsejében haladt. Az így összegyűjtött eseményhalmaz alapján meghatároztuk a plazmajellemzőket az üreg belsejében és határán, továbbá a töltött részecske populációkban az üreg-áthaladások során bekövetkező változásokat. Vizsgálni tudtuk az események térbeli eloszlását is, ennek alapján sikerült meghatároznunk a diamágneses üreg alakját és méretét, valamint az ezt befolyásoló legfontosabb tényezőket. Megmutattuk, hogy a magból kiáramló anyag sűrűlódás jellegű hatásának, valamint a napszél nyomás változásainak összjátéka egy rendkívül dinamikus „szuszogó” határfelületet hoz létre, így az üreg perces skálán képes jelentősen felfúvódni és összehúzódní. Modellünk nagyon jól leírja a megfigyeléseket, a globális tulajdonságoktól egészen az áthaladások során megfigyelt lokális jelenségekig.*

## Bevezetés

Az üstökösök, mint látványos égi jelenségek régóta rabul ejtették az emberek képzeletét. Mint a Naprendszer születésének kövületeit az űrkorszakban is komoly tudományos érdeklődés övezi őket. Amint lehetőség nyílt rá megkezdődött űrszondás vizsgálatuk, és a közeli méréseknek sok fontos tudományos eredményt köszönhetünk. Ezek egyike volt az 1P/Halley üstökös diamágneses üregének felfedezése [1]. Mintegy 4500 km-re az üstököstől a Giotto űrszonda hirtelen egy olyan tartományba ért, ahol a mágneses tér a szonda rendkívül érzékeny magnetométerének mérési hibáján belül nulla volt. Az űreszköz több mint 8500 km-t utazott ebben a mágneses tér mentes térrészben, majd egy újabb éles átmenet során kibukkant belőle. Évtizedekig ez volt az egyetlen diamágneses üreg megfigyelés.

A következő ilyen észlelésre egészen 2015-ig kellett várni, amikor a Rosetta űrszonda magnetométere a mágneses tér eltűnését észlelte a 67P/Csurjumov-Geraszimenko üstökös plazmakörnyezetének belső régiójában [2].

Az ESA nemzetközi Rosetta küldetésének célja, hogy hosszan, a teljes aktivitási időszak során megfigyelje egy üstökös „életét”. A korábbi üstökös megfigyelő programok ún. „átrepülések” voltak: az űreszközök pályamenti sebességét nem igazították a célpont üstökös sebességéhez, ezért a mérések néhány napos (órás, ill. a diamágneses üreg esetében perces) időszakra korlátozódtak. A Giotto 8500 km-es üreg átrepülése pl. az óriási relatív sebesség miatt mindössze két percig tartott. A Rosetta keringő egysége viszont több mint két évet töltött a Csurjumov-Geraszimenko üstökös közvetlen közelében, sőt egy leszálló egységet is küldött az

üstökösmağ felszínére. Ezek a megfigyelések megsokszorozták az üstökösökkel kapcsolatos tudásunkat.

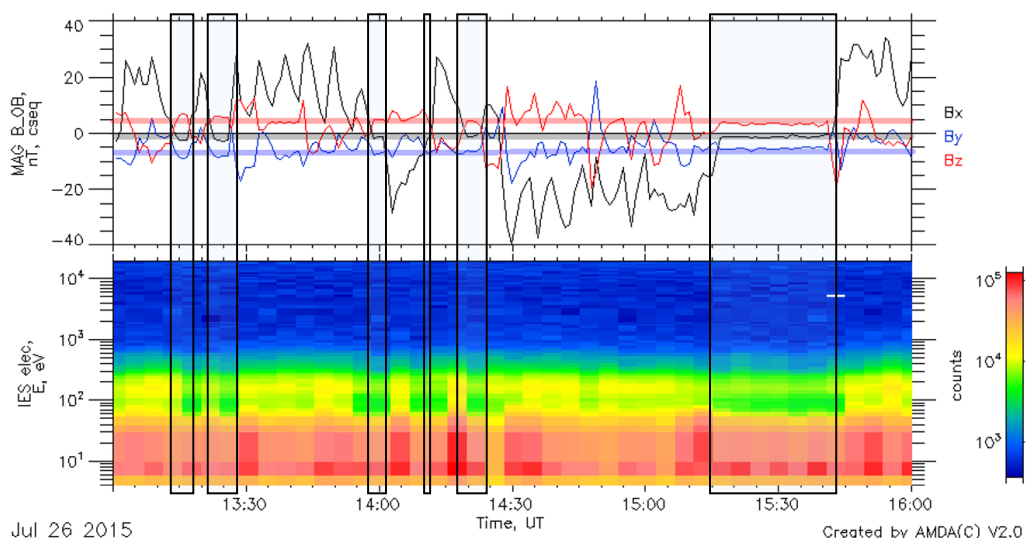
Az üreg kialakulásának mechanizmusa ma is intenzív kutatások tárgya, bár az első modellek hamar megszülettek. Kezdetben többen hajlottak arra, hogy a jelenség a Biermann és munkatársai által megjósolt [3] napszél mentes tartomány megnyilvánulásának tekinthető. A napszél lelassul és eltérül egy eléggé nagy aktivitású üstökös környezetében, aminek következtében kialakul egy kontakt felület, amely elválasztja a csak üstökös eredetű gázt és plazmát tartalmazó tartományt attól a térrésztől, ahol a napszél ionjai is megfigyelhetők. Ésszerűnek tűnt, hogy a napszélbe befagyott mágneses tér sem képes áthaladni ezen a felületen. A „napszél mentes” és „mágneses tér mentes” üreg azonban két független jelenség, amelyeket sajnos sokan máig kevernek, de amelyek mind kialakulási mechanizmusban, mind térben elkülönülnek. Ezt a térbeli elkülönülést demonstrálták például a Rosetta küldetés mérései, melyek szerint az űrszonda már több hónapja a napszél mentes térrészben tartózkodott [4], mire az első diamágneses üreg megfigyelésre sor került. A mágneses tér befagyása csak azt biztosítja, hogy egy fluxuscső plazmatartalma továbbra is azon a fluxuscsővön marad, de nem mond semmit a plazma eloszlásáról a fluxuscső mentén. Kialakulhatnak olyan tartományok, ahol a fluxuscső „üres”, vagyis nem tartalmaz plazmát. Hasonló jelenség játszódik le egy nem mágneses, szigetelő anyagú objektum (pl. egy aszteroida) esetében, amelyet a plazma nyilvánvalóan meg kell, hogy kerüljön, de amelyen a mágneses erővonalak áthaladnak. Nem az a kérdés tehát, hogy „mi viszi be” a mágneses teret a kontakt felületen belülré, hanem, hogy mi az a mechanizmus, amely kiszorítja azt a diamágneses üregből.

Cravens [5] valamint Ip és Axford [6] ezt a mechanizmust az ionoknak a semleges atomokon történő „súrlódásában” találta meg. Az aktív üstökösmağból a szublimáló illó anyagok nagyjából állandó (~1 km/s) sebességgel áramlanak kifelé. A Nap UV sugárzása, valamint az ionizáló korpuszkuláris sugárzások hatására a kiáramló gáz részben ionizálódik, de továbbra is megőrzi a semleges gáztól örökölt átlagsebességét. Amikor azonban ez az anyag becsapódik a külső, mágneses teret hordozó tartományba, az ionok és elektronok átlagsebessége közel nullára kell csökkenjen a mágneses térhez képest. (Az elektronok szinte azonnal megállnak, a továbbhaladó ionokat pedig a töltésszétválásztás következtében kialakuló ambipoláris tér állítja meg.) A lelassított plazma impulzus változásából fakadó nyomás azonban önmagában nem lenne elég ahhoz, hogy ellensúlyozza az üreg határán megfigyelhető mágneses nyomást. Viszont ahogy a semleges atomok ütköznek az ionokkal, újra és újra felgyorsítják azokat, és az ebből fakadó erő (az ion-semleges súrlódás) tart egyensúlyt a külső mágneses nyomással.

## Eredmények

Az eltelt évtizedek alatt finomított modellek [7,8,9] a 67P üstökös esetére maximum néhányszor 10 km-es diamágneses üreg méretet jósoltak, ezért nagy meglepetés volt a 2015. július 26-i esemény, amikor a keringő egység több mint 25 percig az üreg belsejében tartózkodott [2]. A meglepő eredményt a felfedezők, valamilyen egyszeri tranziens jelenségnek tulajdonították.

A felfedezés nyomán megvizsgáltuk a diamágneses üreg környezetének részecske méréseit, és jól azonosítható, az üreg áthaladásokra jellemző nyomokat találtunk mind a nagy energiájú (IES [10]), mind a termikus plazma részecskéket mérő (MIP [11]) műszerek jeleiben. Meglepetésünkre ezek a jelek jelen voltak nem csak a megtalált üreg időszakában, de több rövid visszatérő jel formájában végig a nap folyamán. Az 1. ábrán néhány ilyen eseményt mutatunk.



1. ábra A felső panelen a Rosetta mágneses tér mérései láthatók. A diamágneses üreg átmetszéseket keretekkel emeltük ki. Mindhárom komponens közel állandóvá válik az üregen belül, de ez az állandó a mágneses szennyezések miatt nem nulla. A halvány vastag vízszintes vonalak a komponensek maradék értékeit jelölik, látható, hogy minden bekeretezett eseménynél a komponensek ugyanazt az értéket veszik fel. Az alsó panel az elektron spektrum időbeli változásait mutatja, a diamágneses üreg eseményeket kísérő erős beütésszám csökkenésekkel.

Habár ezekben az időszakokban a mágneses tér értéke nem csökkent nullára, a mágneses fluktuációk kisimultak, és a tér komponensek egy-egy konstans érték közelébe álltak be. Ezek a konstans értékek egymáshoz közeli eseményeknél általában azonosak, vagy nagyon hasonlóak voltak. Tudván, hogy a Rosetta űrszonda mágnesesen igen szennyezett, és a magnetométer kalibrációja még korántsem tekinthető véglegesnek, adódott a feltételezés, hogy a többi hasonló esemény is diamágneses üreg észlelés, a bennük mért közel konstans maradék tér kalibrációs hiba. Mivel a részecske jelek szinte „kiugrottak” a háttérből, kezünkben volt egy módszer, amit diamágneses üreg áthaladások keresésére lehet használni mágnesesen szennyezett üreszközök fedélzetén is. Megvizsgálva a teljes 2015 nyári időszakot, rövid idővel az első észlelés után több mint 100 áthaladást fedeztünk fel. Többek között ezen eredmények segítségével lehetővé vált a magnetométer pontosabb kalibrálása, és az újrakalibrált nagy felbontású mágneses adatoknak köszönhetően mára már közel 700 ilyen eseményről tudunk.

Az eredmények több fontos kérdést is felvetettek. Mi okozza a részecske mérésekben észlelt jeleket? Hogy lehet az üstökösmagtól ilyen távol ilyen sokszor észlelni a diamágneses üreget? Miért ilyen szaggatottak az észlelések (ellentétben a Halley-nél tapasztalt egyszeri folytonos áthaladással)? Ezekre a kérdésekre válaszolunk a következőkben.

A szupratermális elektronok intenzitás csökkenéseit egy olyan elektron populációnak tulajdonítjuk, amely a magtól távolabb keletkezett, és a mágneses tér összennyomódása miatt érte el a mért energiákat. Ez a populáció a mágneses erővonalakhoz kötött; ha a tér kiszorul egy tartományból, ezek az elektronok sem tudnak bejutni. A termális plazma jeleit az okozza, hogy amikor az üreg belsejéből jövő nyugodt áramlás beleütközik a mágnesezett anyagba, a plazma feltorlódik, sűrűsége többszörösére nő. Ez a sűrűségváltozás tükröződik a szupratermális ion adatokban is, mivel a plazma jellegének változása megváltoztatja a szonda elektromos potenciálját is, és így azt is, hogy mennyi ion terelődik be a detektorokba.

A második és harmadik kérdés megválaszolására újra megvizsgáltuk a semleges súrlódás Cravens-féle modelljét. Azt találtuk, hogy amennyiben megfelelő adatokat táplálunk be

a modellbe a gázkiáramlási rátával és a külső nyomással kapcsolatban, a modell nagyon pontosan képes visszaadni a megfigyelt határfelület távolságot. A gázkiáramlási rátát megtisztított Rosetta mérések szolgáltatták [12], a külső nyomás meghatározására üridőjárasi modelleket használtunk, ill. kidolgoztunk két módszert is, amellyel egy adott helyen mért mágneses térből megbecsülhető a feltorlódott mágneses tér maximális értéke, ami arányos a napszél nyomásával. Az üreg határfelületének pozícióját egy dinamikus egyensúly határozza meg: belülről a magból kiáramló anyag próbálja felfújni az üreget, az aktivitás növekedésével ez az erő növekszik. Kívülről a napszél nyomása próbálja összenyomni a diamágneses tartományt. A napszél nyomásában bekövetkező hirtelen változások miatt az üreghatár gyakorta hirtelen kitágul vagy összenyomódik; szuszog.

## **Konklúzió**

Munkánk során kidolgoztunk egy a részecske méréseken alapuló módszert a diamágneses üreg megtalálására, amely a mágnesesen szennyezett Rosetta űrszonda fedélzetén nagyon jól használható. A módszerrel több, mint száz diamágneses üreg áthaladási eseményt fedeztünk fel. A módszer segített a magnetométer újrakalibrálásában, és közvetve több száz újabb üreg esemény megtalálásában. Meghatároztuk az üreghöz kapcsolódó részecske eseményeket, valamint megmagyaráztuk, hogy ezek miért következnek be. Megmutattuk, hogy a semleges súrlódás Cravens-féle modellje megfelelő bemenő adatok esetén nagyon jól visszaadja a mért üreg méreteket. Megmutattuk mely bemenő paraméterek használhatók, illetve módszereket dolgoztunk ki a hiányzó adatok meghatározására. Ezek alapján kiszámítottuk a diamágneses üreg méretét az üreg-megfigyelések időszakára, és az eddigi legjobb egyezést kaptuk. Eredményeink nagyszerűen leírják nem csupán az üreg átlagos méretét, de a méret gyors dinamikus változásait is.

## **Köszönetnyilvánítás**

Az adatfeldolgozást részben az AMDA tudományos analízáló rendszerrel végeztük melyet a Centre de Données de la Physique des Plasmas (CDPP) biztosított, a CNRS, CNES, Observatoire de Paris és az Université Paul Sabatier, Toulouse támogatásával. Németh Zoltán munkáját az MTA Bolyai János kutatási ösztöndíj segítette.

## **Irodalom**

- [1] Neubauer F. M. et al. (1986), Nature, 321, 352
- [2] Goetz C., et al. (2016), Astronomy & Astrophysics, 588, A24
- [3] Biermann L., Brosowski B., Schmidt H. U. (1967), Sol. Phys., 1, 254
- [4] Behar E. et al. (2016), Geophys. Res. Lett., 43, 1411
- [5] Cravens T. E., (1986), in: ESA Special Publication Vol. 250, ESLAB Symposium on the Exploration of Halley's Comet, szerk. Battrick B., Rolfe E. J., Reinhard R., ESA.
- [6] Ip W.-H., Axford W. (1987), Nature, 325, 418
- [7] Gombosi T. I., (2015), Physics of Cometary Magnetospheres. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ,
- [8] Koenders C. et al. (2015), Planet. Space Sci., 105, 101
- [9] Rubin M. et al. (2015), Earth Moon and Planets, 116, 141
- [10] Burch J. L. et al. (2007), Space Science Reviews, 128, 697
- [11] Trotignon J. G. et al. (2007), Space Science Reviews, 128, 713
- [12] Hansen K. C., et al., (2016), MNRAS, 462, 491